

Abschlussbericht

**Machbarkeitsstudie für die Anwendung einer
mikrobiellen Brennstoffzelle
im Abwasser- und Abfallbereich
AZ 26580- 31**

Gefördert von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt - Osnabrück

Berichtszeitraum: 16.12.2008 bis 31.08.2010

Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers*

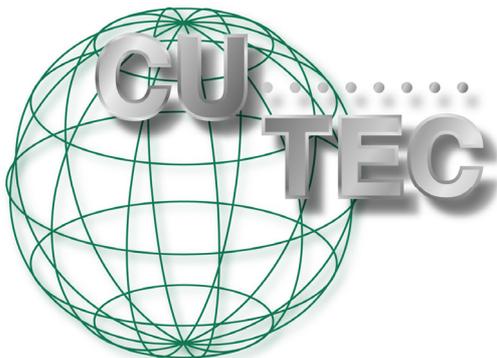
Dr. Ottmar Schläfer*

Dipl.-Ing. Hinnerk Bormann*

Dipl.-Ing. Michael Niedermeiser*

Prof. Dr. Detlef Bahnemann**

Dr. Ralf Dillert**



***Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH
– CUTECH-Institut GmbH –**
Leibnizstr. 21 + 23
D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel. +49 (0)5323 933-0
Fax +49 (0)5323 933-100
Internet www.cutec.de

****Leibniz Universität Hannover**
Institut für Technische Chemie
Callinstr. 5
D – 30167 Hannover

Tel. +49 (0)511762-2269
Fax +49 (0)511762-3004
Internet www.tci.uni-hannover.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Stand des Wissens	5
2.1. Kleiner Rückblick.....	6
2.2. Funktionsbeschreibung	6
2.3. Bisherige Entwicklung der maximal erzielten Stromdichten von MBZ	8
2.4. Einflussgrößen (=Ansätze) bezüglich Leistungssteigerung.....	9
3. Ergebnisse.....	10
3.1. Ausgangssituation	10
3.2. Verfahrenstechnische Merkmale der MBZ.....	10
3.3. Abschätzung des Anwendungspotenzials.....	11
3.3.1. Vorversuch.....	11
3.3.2. Auswirkungen eines MBZ-Einsatzes auf der Kläranlage	12
3.3.3. Kostenbetrachtungen	13
3.4. Experimentelle Untersuchungen.....	15
3.4.1. Aufbau der MBZ-Versuchsanlage.....	15
3.4.2. Erste Ergebnisse.....	16
Literaturverzeichnis.....	18

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispielhafter Aufbau einer MBZ mit „chemischer“ Kathode.....	6
Abbildung 2:	Funktionsprinzip Biokatalyse auf der Anodenseite der mikrobiologischen Brennstoffzelle unter Beachtung verschiedener Redoxpotenziale.....	7
Abbildung 3:	Die Entwicklung der Leistungsdichte der MBZ von 1999 bis 2008.	8
Abbildung 4:	Zeitlicher CSB-Verlauf und zugehörige Leistungsdichte während des Behandlung von vorgeklärtem kommunalen Abwasser und einer Acetatlösung.....	12
Abbildung 5:	MBZ-Prüfstand (links) und Ansicht eines Zellenmoduls mit vier Einzelzellen in Reihenschaltung (rechts)	15
Abbildung 6:	Zeitlicher Verlauf der Leistungsdichte	16
Abbildung 7:	Leistungsdichte der MBZ als Funktion des Lastwiderstandes	17

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Stromproduktionspotenzial für verschiedene Kläranlagengrößen.....	12
Tabelle 2:	Stromeinsparungspotenzial für verschiedene Kläranlagengrößen.....	13

1. Einleitung

Mikrobielle oder bioelektrochemische **B**rennstoffzellen (MBZ) enthalten lebende Mikroorganismen, die aus komplexen organischen Substraten direkt elektrischen Strom produzieren. Gegenüber chemischen Brennstoffzellen haben MBZ den Vorteil, dass die Generierung von elektrischem Strom unter sehr milden Bedingungen (Raumtemperatur, Umgebungsdruck) erfolgt. Ein weiterer Vorteil ist die Katalysatorlebensdauer. Die Mikroorganismen vermehren sich unter geeigneten Bedingungen selbst, so dass der (Bio-)Katalysator laufend reproduziert wird und deshalb kein Katalysatorverbrauch existiert.

Die Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der MBZ befinden sich noch am Anfang. Es gibt weltweit erst ca. 15 Forschergruppen, die sich in den letzten Jahren intensiv mit der Thematik beschäftigt haben. Die internationalen Schwerpunkte liegen derzeit im amerikanischen, australischen und asiatischen Raum. Untersuchungen zur MBZ liegen bisher nahezu ausschließlich für den Labormaßstab vor, Untersuchungen im Technikums-/Pilotmaßstab liegen nur vereinzelt vor, werden jedoch zurzeit verstärkt in Angriff genommen.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse aus der Grundlagenforschung zeigen, dass die MBZ ein großes Anwendungspotenzial besitzt. Insbesondere die direkte Stromproduktion aus Abwässern (industrielle und kommunale Abwasserbehandlung) könnte sich als interessantes Anwendungsgebiet herauskristallisieren. Allerdings liegen bisher kaum Erkenntnisse im Hinblick auf technische Umsetzbarkeit vor. Fragen hinsichtlich der limitierenden Faktoren für größere elektrischen Leistungen sind noch nicht bzw. nicht ausreichend genug untersucht worden. Auch fehlen technische Reaktorkonzepte, so dass eine wirtschaftliche Anwendung noch nicht bewertbar ist.

Im Rahmen eines von der DBU geförderten Projektes wurde deshalb eine Machbarkeitsstudie erstellt. Ziel der Studie ist es, die genannten Fragestellungen aufzugreifen und die Machbarkeit einer technischen und wirtschaftlichen Umsetzung zu bewerten. Sie soll auch eine Hilfestellung für das weitere Vorgehen leisten und gegebenenfalls neue Entwicklungsarbeiten anstoßen, insbesondere innerhalb der Forschungsgemeinschaft in Deutschland. Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie werden nachfolgend beschrieben.

2. Stand des Wissens

Das Forschungsgebiet ist derzeit sehr dynamisch. Fortlaufend neue Erkenntnisse führen dazu, dass Zusammenfassungen zum Stand des Wissens vor allem bezüglich Leistungsfähigkeit und Reaktorkonzept schnell veralten. Dies möge bei der Lektüre nachfolgender Zusammenfassung beachtet werden. Wesentlich detaillierte Beschreibungen zu verschiedensten Erkenntnissen sind in Büchern von Logan (2008) und Rabaey et al. (2010).

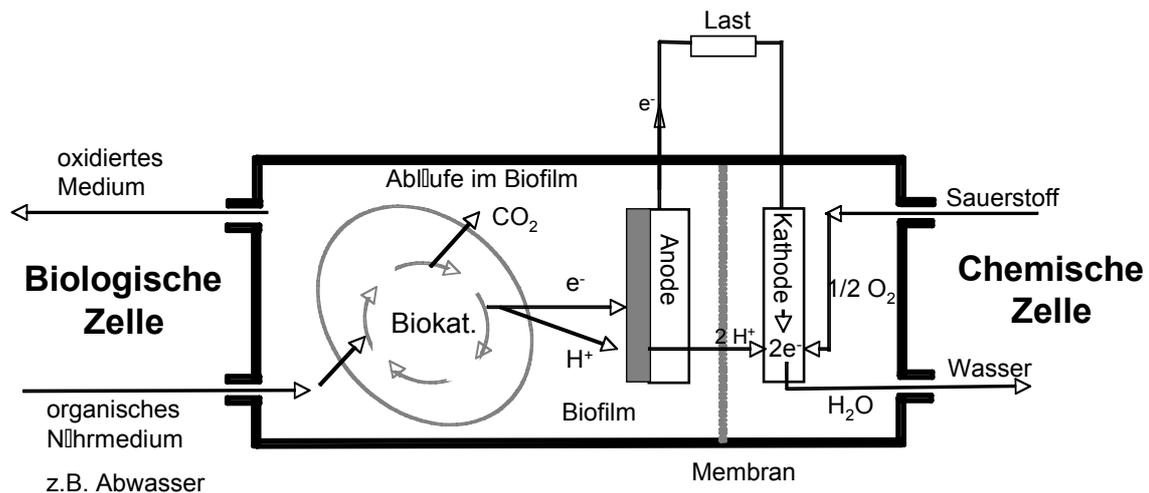
2.1. Kleiner Rückblick

Die Idee der mikrobiologischen Brennstoffzelle ist nicht neu. Nachdem bereits 1911 die Biopotenzialdifferenz entdeckt wurde, führten frühe Ideen der „bakteriellen Batterie“ (1931) zum NASA-Konzept für „abfallfreie Energiesysteme“ in 1966 und später zu kommerziellen Entwicklungen für die Seefahrt in 1975. Diese Systeme benutzten flüssige „Mediatoren“ für den Elektronentransfer zwischen Organismus und Anode und fanden keine weitergehende Verbreitung insbesondere wohl auch wegen der großen Umwelt- und Gesundheitsgefährdung, die von den Mediatoren ausging.

1962 wurde erstmals über eine mediatorenfreie MBZ berichtet (Rohrback 1962, zitiert in Sell 2004, Sell 1991 zitiert in Lämmel 1999). Diese Erkenntnis sowie das seit der Energiediskussion Anfang 2000 stetig steigende Interesse an erneuerbaren Energien haben zu vielen Pionierarbeiten mit Leistungssteigerungen von $0,1 \text{ mW/m}^2$ in 2000 auf größer 2.400 mW/m^2 in 2008 geführt. Es ist dabei zu beachten ist, dass diese Leistungen im Labormaßstab erzielt wurden.

2.2. Funktionsbeschreibung

Die MBZ besteht im Wesentlichen aus einer Anode, einer Kathode und einer ionenselektiven Membran. Das Funktionsprinzip ist vergleichbar mit dem einer chemischen Brennstoffzelle mit dem Unterschied, dass die Elektronenabgabe an die Anode über Mikroorganismen erfolgt. Die Mikroorganismen, die im Biofilm auf der Anodenoberfläche wachsen, nehmen organische Stoffe aus der Flüssigkeit in der Anodenkammer auf und geben einen Teil der chemisch gebundenen Energie in Form von Elektronen an die Anode ab. Abbildung 1 fasst das Funktionsprinzip einer bioelektrochemischen Brennstoffzelle zusammen. Zu unterscheiden ist dabei zwischen den beiden Möglichkeiten einer biologischen Anode mit chemischer Kathode und einer biologischen Anode mit biologischer Kathode.



thode.

Abbildung 1: Beispielhafter Aufbau einer MBZ mit „chemischer“ Kathode.

Die für die Anodenreaktion interessante Fähigkeit von Mikroorganismen, freie Elektronen ins Medium abzugeben, wird als Exoelektrogenese bezeichnet. Diese Gruppe von Bakte-

rien gehört zu den anaeroben Atmern. Sie ist in der Lage verschiedene anorganische Stoffwechselprodukte der gärenden Organismen durch die Abgabe von freien Elektronen weiter zu reduzieren und dadurch eine Elektronentransportphosphorylierung (ähnlich den Atmern) zu betreiben und dadurch erheblich mehr Energie zu gewinnen, als die gärenden Organismen. Die Atmungsarten werden nach den anorganischen Elektronenakzeptoren bezeichnet (z.B. Schwefelatmung, Fumarat-Atmung, Eisenatmung etc.) und spielen in biotechnischen Prozessen eine wichtige Rolle. Für die MBZ ist vor allem die Carbonat-Atmung von Bedeutung in der z.B. durch Vertreter der Gattung „Geobacter“ CO_2 und Carbonat-Ionen durch die Abgabe freier Elektronen zu Methan und Essigsäure umgesetzt werden.

Von Bedeutung ist hierbei das Zusammenspiel verschiedener enzymatischer Reaktionen (Biokatalyse) im Biofilm bei unterschiedlich hohen Redoxpotenzialen, wie Abbildung 2 veranschaulicht.

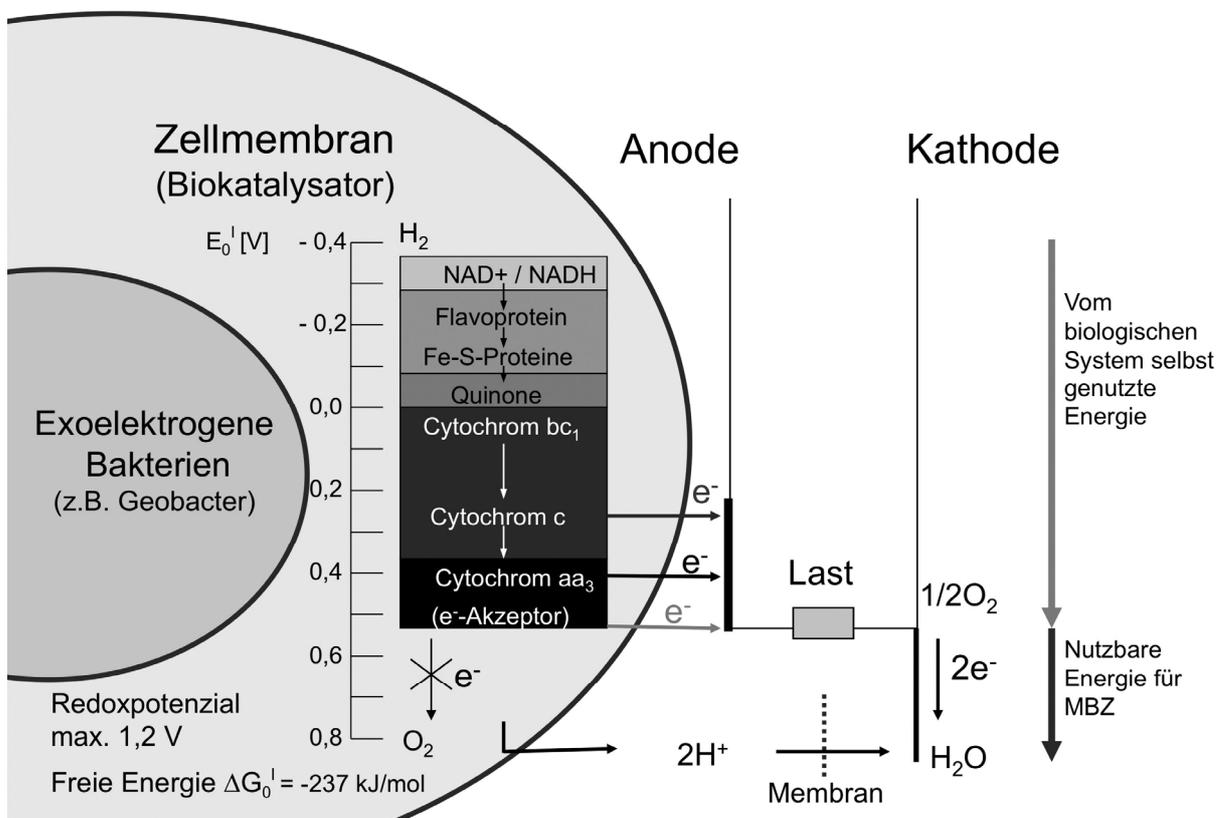


Abbildung 2: Funktionsprinzip Biokatalyse auf der Anodenseite der mikrobiologischen Brennstoffzelle unter Beachtung verschiedener Redoxpotenziale.

Die Elektronen des organischen Substrats werden nach ihrer Abspaltung auf dem Niveau von $-0,4 \text{ V}$ auf den ersten Elektronenakzeptor der Elektronentransportkette übertragen (NAD^+). Von hier aus hätten die Elektronen beim Durchlaufen der aeroben Atmungskette mit Sauerstoff als Endakzeptor ($E_0^1 +0,8\text{V}$) eine Potenzialdifferenz von $1,2 \text{ V}$. In Abwesenheit von Sauerstoff (anaerobe Atmung) müssen die Elektronen jedoch auf dem Energieniveau des verfügbaren anorganischen Elektronenakzeptors abgegeben werden. Dem Organismen steht daher für die eigene Energiegewinnung nur der erste Teil der Elektronentransportphosphorylierung zur Verfügung (NAD^+ bis Cytochrom c). Die Elektronen besitzen auf diesem Abgabe-Niveau jedoch noch eine „Restenergie“ gegenüber dem

Sauerstoff und anderen Elektronenakzeptoren. Dies macht man sich bei der MBZ zu Nutze indem man, anstatt eines anorganischen Elektronenakzeptors, eine Elektrode (Anode) auf ähnlich hohem Redoxpotenzial anbietet und die Elektronen auf diesem Niveau abfängt. Durch die räumlich getrennte Übertragung dieser Elektronen auf z.B. Sauerstoff in der MBZ wird letztlich die anaerobe Atmungskette der Organismen (Biofilm auf der Anode) technisch zu einer „aeroben Atmung“ erweitert (Kathodenreaktion) und die vorhandene Potenzialdifferenz zwischen Anode und terminalem Elektronenakzeptor an der Kathode (z.B. Sauerstoff) durch den besonderen Aufbau der MBZ technisch nutzbar gemacht.

Der Stromkreis für eine externe Energienutzung wird über die Potenzialdifferenz zwischen Anode und Kathode aufgebaut, indem z.B. eine ionenselektive Membran zwischen Anodenkammer und Kathodenkammer angeordnet und ein Elektronenakzeptor (z.B. Sauerstoff, Nitrat, Sulfid) in der Kathodenkammer bereitgestellt wird. Es gibt jedoch bereits einige Hinweise darauf, dass eine ionenselektive Membran nicht unbedingt erforderlich ist (Logan 2008). Ein Ziel bei der Entwicklung der MBZ ist u.a. die Senkung des Redoxpotenzials bei der Elektronenabgabe. Dies ist gleichbedeutend mit einer Reduzierung der vom biologischen System selbst genutzten Energie und führt zu einer Erhöhung der Potenzialdifferenz zwischen den Elektroden.

2.3. Bisherige Entwicklung der maximal erzielten Stromdichten von MBZ

Seit Untersuchung der ersten mediatorenfreien MBZ im Jahre 1999 sind die maximal erzielten Leistungsdichten sprunghaft angestiegen. Abbildung 2 (nach Logan et al. 2008) zeigt die Entwicklung der Leistungsdichte von 0,05 mW/m² in 1999 auf 2700 mW/m² in 2008.

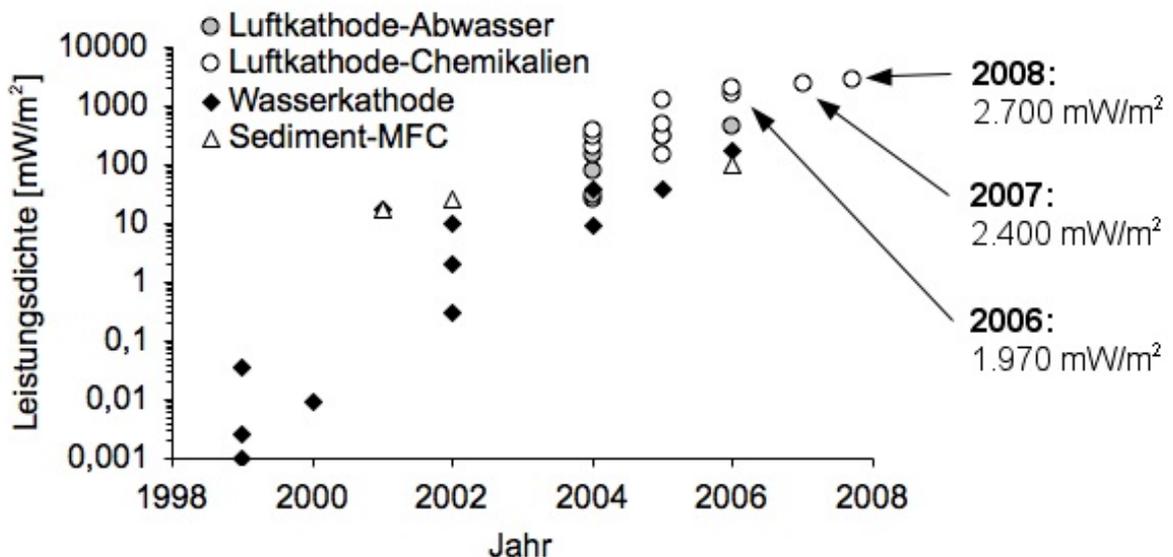


Abbildung 3: Die Entwicklung der Leistungsdichte der MBZ von 1999 bis 2008.

Zu beachten ist dabei insbesondere die Unterscheidung zwischen Luftkathode und Wasserkathode als auch die Unterscheidung zwischen den Arten von organischen Stoffen, die in der Anodenkammer abgebaut werden. Reine Chemikalien (= Glukose oder Acetat) sind wesentlich leichter biologisch abbaubar als die meisten organischen Abwasserinhaltsstoffe. Auch die Leitfähigkeit der organischen Flüssigkeit ist in der Regel deutlich höher, so

Leistungsdichten bei Abwasseruntersuchungen niedriger sein müssen. In diesem Zusammenhang ist es interessant, dass mit der Luftkathode bei der Abwasserbehandlung höhere Stromdichten erzielt wurden als mit der Wasserkathode beim Abbau von reinen Chemikalien.

Die in den letzten Jahren erreichte Steigerung der Leistungsdichten wurde durch Beeinflussung vieler Faktoren erzielt. Diese werden im nachfolgenden Kapitel ohne Anspruch auf Vollständigkeit aufgelistet. Ein wesentlicher Punkt, der bei der Bewertung von Abbildung 3 zu beachten ist, sind die verwendeten Reaktordimensionen im Milliliterbereich. Größere Reaktordimensionen waren bisher zwangsläufig mit einer Leistungseinbuße verbunden. Insbesondere die Erfahrungen mit der weltweit ersten Pilotanlage (Rozendal et al. 2008) zeigten, dass viele Erfahrungen und Randbedingungen aus der Verfahrenstechnik, Elektrochemie, Biofilmchemie, Katalyse, Beschichtungstechnik, Elektrotechnik und Maschinen-/Apparatetechnik bisher nicht oder nur unzureichend berücksichtigt wurden.

2.4. Einflussgrößen (=Ansätze) bezüglich Leistungssteigerung

Nachfolgend sind einige Einflussfaktoren aufgelistet.

- Elektrodenabstand
- Leitfähigkeit Elektrolyt
- Innerer Widerstand
- Membran
- Ohmscher Widerstand Elektrodenmaterial
- Kollektor
- Sauerstoffdiffusion
- Elektrodenpotenzial (poised potentials)
- Protonentransport (Selektivität, Geschwindigkeit, Polarisation)
- Redox-Potenzial
- pH-Wert
- Elektrodenoberfläche (Material, Dicke, Struktur, Fläche)
- Oberflächenladung
- Wasseraustritt (Diffusionshemmung Sauerstoff)
- Biofilmstruktur (Einfluss Scherrate etc.)
- Externer Widerstand

Viele der Faktoren beeinflussen andere bzw. sich gegenseitig, so dass aussagekräftige Angaben bezüglich Gesamtleistung einer MBZ nur anhand von Untersuchungen in einem Gesamtsystem möglich sind. Halbzellenversuche sind zeitsparender und für grundlegende Untersuchungen besser geeignet. Sie sind als Vorstufe bzw. Ergänzung zu sehen, können jedoch keine abgesicherten Aussagen zur erzielbaren Gesamtleistung geben und sind grundsätzlich anhand von Untersuchungen am Gesamtsystem zu überprüfen. Gute Beispiele, die dies bestätigen, sind die

- Konzentrationspolarisation, die sich bei höherer Leistungsdichte zunehmend einstellt und einen Leistungsabfall hervorruft, der die reaktionstechnische Optimierung von Anoden und Kathoden reduziert sowie
- und der erfolgreiche Einsatz einer membranlosen MBZ, wobei als Diaphragma amerikanische Küchenputztücher mit der Bezeichnung J-Cloth® eingesetzt wurde.

Bis vor kurzem wurde noch davon berichtet, dass bisher nur Vermutungen angestellt werden können, warum dies so sei,

- neue Erkenntnisse zur Re-Organisation und Anpassung von Biofilmstrukturen, die mit bisherigen Biofilmmodellen nicht ausreichend abgebildet werden. Kurzzeitige Ergebnisse, die diese Re-Organisation nicht berücksichtigen können, sind daher weniger aussagekräftig.

3. Ergebnisse

3.1. Ausgangssituation

Der derzeitige Stand der Entwicklung lässt sich zusammenfassen mit folgenden Stichpunkten:

- Bisher erfolgte weitestgehend eine Grundlagenforschung weltweit; Scale-up Untersuchungen stehen am Anfang (Australien, USA).
- Nur wenige Untersuchungen liegen vor zur Realisierung größerer Spannungen (Parallel-Reihenschaltung von Zellen); auch Rückkopplungseffekte, die zur Leistungseinbuße führen, wurden festgestellt.
- Reaktorkonzepte sind derzeit in der Entwicklung (Aufwuchsfläche, Strömungstechnik etc.), Untersuchungsergebnisse liegen nur vereinzelt vor.
- Es können erhebliche Stickstoffverluste auftreten.
- Das Einkammersystem mit Luftkathode scheint derzeit am leistungsfähigsten.
- Zunehmende Untersuchungen erfolgen mit der Biokathode (z.B. Denitrifikation, Sulfatreduktion), da diese wegen des Verzichtes auf Metall-Katalysator in der Herstellung am kostengünstigsten erscheint.
- Ein Einsatz von Diaphragma ohne ionenselektive Membran ist auch möglich.
- Am Markt verfügbare Elektroden sind zu kostenintensiv; ein Verzicht auf teure Edelmetallkatalysatoren scheint erforderlich.

Ausgehend von dieser Situation, stellte sich die Frage, welches Potenzial bietet die MBZ im Bereich der Abwasser- und Abfallbehandlung. Hierzu wurden zunächst die verfahrenstechnischen Merkmale zusammengefasst.

3.2. Verfahrenstechnische Merkmale der MBZ

Die mediatorenfreie MBZ wird derzeit als Biofilmverfahren realisiert. Interessant ist, dass auch bei geringen CSB-Konzentrationen von kleiner 100 mg/L Strom produziert wird, wobei die Stromproduktion weniger von der Konzentration als vielmehr von der Abbaubarkeit des CSB abhängt. Leicht abbaubare Stoffe ermöglichen eine höhere Stromdichte (Kinetik) und erfordern weniger enzymatische Abbauschritte (höhere spezifische Ausbeute). Zu beachten ist dabei, dass die Effizienz der Umwandlung organischer Stoffe in Strom maßgeblich von der Biofilmstruktur beeinflusst wird.

Weiterhin ist bei den bisher erzielten Leistungsdichten die Umgebungstemperatur ausreichend. D.h. es ist kein Zusatzwärmebedarf wie bei mesophilen oder thermophilen Prozessen vorhanden. Es sind zwar Temperaturabhängigkeiten bekannt, doch diese sind im Vergleich zu Anaerobverfahren deutlich kleiner.

Weiterhin wurde berichtet, dass eine geringe Feststoffbelastung des Abwassers den Wirkungsgrad der MBZ positiv beeinflusst und die Wachstumsrate der beteiligten Mikroorganismen gegenüber Methanbakterien vergleichsweise hoch ist.

Diese verfahrenstechnischen Merkmale zeigen, dass die MBZ derzeit weniger als Konkurrenz zu den etablierten Anaerobverfahren zu sehen ist, sondern vielmehr als Ergänzung. Weiterhin wird durch den möglichen Abbau von CSB auf kleinem Konzentrationsniveau unterhalb 500 mg/L sowie bei Umgebungstemperaturen deutlich, dass die MBZ eher eine Konkurrenz für Aerobverfahren darstellt. Dies gilt, soweit die Stickstoffelimination anderweitig gelöst wird.

3.3. Abschätzung des Anwendungspotenzials

3.3.1. Vorversuch

Zur Abschätzung des Anwendungspotenzials wurde zunächst ein Vorversuch mit kommunalem Abwasser durchgeführt. Als MBZ wurde ein konventionelles Zweikammersystem mit einer Graphitelektrode auf der Anodenseite und einer platinhaltigen Graphitelektrode auf der Kathodenseite verwendet. Beide Kammern waren durch eine NAFION® Membran getrennt, wobei die Anodenseite anaerob gehalten und die Kathodenseite mit Luft begast wurde. Diese Anordnung wird seit Anfang 2000 untersucht und weist keine große Effizienz auf (vgl. Abbildung 3). Trotzdem kann man über den zeitlichen Verlauf der relativen Stromabgabe Erkenntnisse zur Abbaubarkeit des Abwassers mittels MBZ gewinnen.

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis des Versuches. Gezeigt werden der zeitliche CSB-Verlauf von Abwasser und Acetat und die jeweils dazugehörige Leistungsabgabe bei 1 kOhm Last. Der CSB des vorgeklärten kommunalen Abwassers betrug 190 mg/L, der Anfangswert der Acetatlösung lag bei 1.900 mgCSB/L. Interessant ist, dass das kommunale Abwasser bis zu einem CSB-Wert von 61 mg/L keinen Leistungsabfall zeigte und der Endwert, bei dem keine Stromproduktion mehr stattfand, 56 mgCSB/L betrug. Prinzipiell ist damit ein sehr weitgehender CSB-Abbau in die Nähe des Direkteinleitgrenzwertes möglich.

Weiterhin zeigt der Abbauversuch mit Acetat einen interessanten Effekt auf, der vermutlich auf Speichereffekte, die aus der Bio-P-Elimination bekannt sind, zurückzuführen ist: Obwohl der Rest-CSB-Wert von ca. 100 mg/l bereits nach 70 h erreicht wurde, ist trotzdem noch weitere 50 Stunden unverändert Strom abgegeben worden.

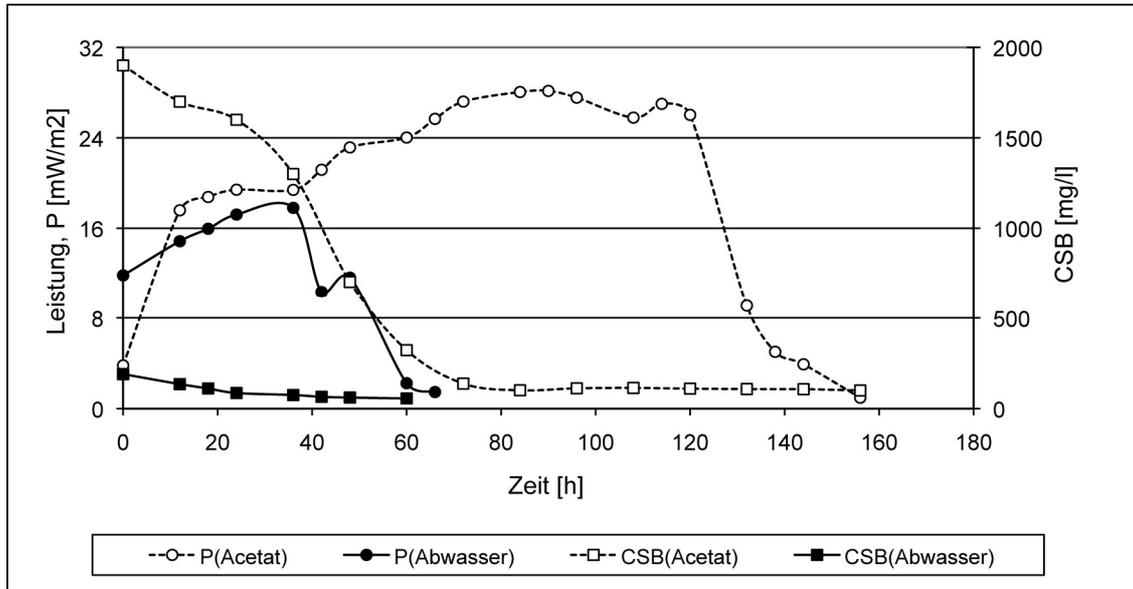


Abbildung 4: Zeitlicher CSB-Verlauf und zugehörige Leistungsdichte während des Behandlung von vorgeklärtem kommunalen Abwasser und einer Acetatlösung.

3.3.2. Auswirkungen eines MBZ-Einsatzes auf der Kläranlage

Der Vorversuch zeigte, dass vorgeklärtes Abwasser gut behandelt werden kann. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind in der Behandlung des Trübwassers aus der Schlammmentwässerung und gegebenenfalls auch aus der Schlammeindickung zu sehen. Durch den CSB-Abbau wird nicht nur Strom produziert, sondern gleichzeitig auch eine Einsparung an Belüftungsenergie ermöglicht.

Die Höhe des Stromproduktionspotenzials wurde anhand des Energieinhaltes des Abwassers und der experimentellen Versuchsergebnisse aus der Literatur unter folgenden Annahmen grob geschätzt.

- 50 % des BSB (= 25% des CSB) im Rohabwasser können verwertet werden (kein Engpass in der Verwertung für die Denitrifikation)
- die experimentellen Werte bezüglich der „Coulomb-Effizienz“ (= Verhältnis von maximal abzugebenden Elektronen zu tatsächlich abgegebenen Elektronen) von 40 % sind bei systemtechnischer Optimierung auch im größeren Maßstab erreichbar

Der Energieinhalt des Abwassers beträgt ca. 20 W pro Einwohnerwert (EW). Damit würde sich für eine 10.000 EW Anlage ein Kraftwerk mit einer Leistung von 20 kW realisieren lassen, für die 100.000 EW Modellanlage analog 200 kW. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick auf das Stromgewinnungspotenzial für verschiedene Kläranlagengrößen zusammen mit der Hochrechnung auf 80 Mio. EW für Deutschland.

Tabelle 1: Stromproduktionspotenzial für verschiedene Kläranlagengrößen

Kläranlagen- größe	Energieinhalt Verwertbar 50 % (Abwasser sehr optimistisch): optimistisch: 25 % mit Ce _{eff} = 40 % als optimale Werte: 1		Verwertbar 50 % (optimistisch: 25 % mit Ce _{eff} = 40 % als optimale Werte: 1)	
	EW	kW	kW	kW
10.000	200	100	50	20
20.000	400	200	100	40
50.000	999	499	250	100
100.000	1.998	999	499	200
Hochrechnung Deutschland			400 MW	160 MW
80.000.000	1.598.174	799.087	399.543	159.817

Die gleichzeitige Einsparung an Belüftungsenergie ergibt sich aus dem zugrunde gelegten BSB- bzw. CSB-Abbau von 50 bzw. 25 %. Für die Abschätzung wurden die Kennzahlen aus dem Energiehandbuch NRW (Müller et al. 1999) herangezogen. Demnach liegt der Energieverbrauch nur für die Belüftung zwischen 16 (größere Anlagen) und 28 kWh (kleinere Anlagen mit aerober Stabilisierung) pro Einwohnerwert und Jahr. Für eine 10.000 EW-Kläranlage, die mit aerober Schlammstabilisierung betrieben wird, beträgt das Energieeinsparpotenzial 8 kW, für eine 100.000 EW Modellanlage beträgt es ca. 45 kW. Die Tabelle 2 gibt einen Überblick auf das Stromeinsparungspotenzial für verschiedene Kläranlagengrößen zusammen mit der Hochrechnung auf 80 Mio. EW für Deutschland.

Tabelle 2: Stromeinsparungspotenzial für verschiedene Kläranlagengrößen

Kläranlagen- größe	CSB-Fracht		25 % CSB Abnahme (10 % in Strom)	Energieeinsparung belüftung bei 16 kWh/EW.a	Energieeinsparung belüftung bei 28 kWh/EW.a
	EW	kgCSB/h	kgCSB/h	kW	kW
10.000	50	12,5	5	8	
20.000	100	25	9	16	
50.000	250	63	23	40	
100.000	500	125	46	80	
Hochrechnung Deutschland			45 MW		
80.000.000	400.000	100.000	45.662		

Zum Vergleich: Eine vollständig optimierte Modellanlage für 100.000 EW nach dem Handbuch NRW hat einen mittleren Leistungsbedarf von 285 kW. Durch den Einsatz der MBZ wäre die Summe aus dem Stromproduktionspotenzial und dem Einsparungspotenzial 246 kW. Berücksichtigt man die Stromproduktion durch Schlammfäulung und Verstromung des Faulgases über ein BHKW, so werden auch nach Abzug von 25 % (durch MBZ verbraucht) immer noch 133 kW erzeugt. Damit können mit einer 100.000 EW Anlage ca. 100 kWh/h Strom erzeugt werden.

Die MBZ bietet somit das Potenzial, kommunale Kläranlagen nicht nur in die Nähe des energieautarken Betriebes zu bringen, sondern in Verbindung mit der Fäulung in beachtenswerte Energieproduktionsanlagen umzuwandeln.

3.3.3. Kostenbetrachtungen

Die Kosten sind für mögliche Anwendungen das wichtigste Entscheidungskriterium. Sie lassen sich erst mit belastbaren Pilotversuchen ermitteln, was voraussetzt, dass die Reaktortechnik vorhanden ist und die Systemtechnik funktioniert. Alles dies ist noch nicht nachgewiesen, so dass eine realistische Kostenbetrachtung nicht möglich ist.

Trotzdem soll an dieser Stelle versucht werden, Hinweise zu den Kostenstrukturen zu geben, weil diese für die weitere Entwicklungsstrategie wertvoll sein können.

Angenommen, es existiert eine MBZ-Anlage mit dem o.g. Stromproduktionspotenzial und eine Kläranlage mit dem entsprechenden Energieeinsparpotenzial. Eine 10.000 EW-Anlage würde bei den o.g. Werten und einem Strompreis von 0,2 Euro pro kWh ca. 50.000 Euro im Jahr einsparen.

Die Summe aus Abschreibungen für Anlagentechnik und Elektrodenstack muss deutlich unter diesen Erlösen bleiben, um eine annehmbare Kapitalrückzahlung zu erwirtschaften. Da schon von mehr als zweijährigem zwischenfallfreiem Betrieb im Labormaßstab berichtet wurde, ist davon auszugehen, dass eine 5- oder 10-jährige Abschreibung für Stack- und Anlagentechnik nicht unrealistisch ist. Die in der Praxis annehmbare Investitionssumme kann damit größenordnungsmäßig abgeschätzt werden.

Die weitergehende Kostenbetrachtung setzt die Kenntnis eines bestimmten Anlagendesigns mit entsprechender Reaktortechnik voraus. Bei der Anlagentechnik sind viele Kostenpositionen zu beachten. Hierzu gehören unter anderem: Reaktorgehäuse, Verkabelung, Resistoren, Spannungswandlung, evtl. Zwischenspeicherung, Automatisierung inkl. Lastregelung, Stackmontage, Anlageninstallation, Inbetriebnahme. Zusätzlich sind die Kosten für die Elektrodenherstellung zu berücksichtigen.

Ohne hier auf Details zu den Annahmen der einzelnen Kostenpositionen einzugehen, kann festgehalten werden, dass bei einer angenommenen Leistungsdichte von 2 Watt pro m^2 Anodenfläche und einer gleichgroßen Kathodenfläche (plus einer eventuellen Membranfläche) die Elektrodenkosten unter 7,5 Euro bezogen auf die Anodenfläche liegen sollte. Diese Zahl ergibt sich aus der Tatsache, dass bei der kleinen Leistungsdichte von 2 W/m^2 eine extrem große Elektrodenfläche erforderlich ist, so dass die Kosten für Elektrodenfläche im Vergleich zu den anderen Kosten dominieren. Die Kostenangabe ist im Zusammenhang mit den publizierten Kostenzielen von 30 US-Dollar pro m^2 zu verstehen, als das sie deutlich macht, dass man viel kostengünstiger werden muss als bisher angenommen. Anhand dieses ersten Anhaltswertes kann man aber auch erkennen, dass bei höheren Leistungsdichten und entsprechend geringerer Elektrodenfläche auch ein Potenzial nach oben besitzt.

Sicherlich liegen hier noch viel zu viele Unsicherheiten vor, um diese Zahl als Maßstab zu nehmen. U.a. ist es durchaus möglich, dass einzelne Kostenpositionen bei der Anlagentechnik zu positiv abgeschätzt wurden. In diesem Fall sind für die Elektrodenkosten kleinere Werte anzusetzen.

Trotzdem kann festgehalten werden, dass in der weiteren Entwicklung viel stärker als bisher auf die Materialentwicklung geachtet werden muss. Dies kann nur erreicht werden, wenn in der Materialauswahl auf kostengünstige Massenprodukte zurückgegriffen und zudem Material sparende Beschichtungstechniken angewendet werden.

Dies wird auch deutlich, wenn man sich die erforderliche Elektrodenfläche bei einer Leistungsdichte 2 W/m^2 für eine 20 kW Anlage vor Augen führt: Es sind 10.000 m^2 Anodenfläche (plus Kathodenfläche plus evtl. Membranfläche) erforderlich.

Auf der anderen Seite ist bekannt, dass sich Biofilmsysteme mit 100 bis 200 m² Aufwuchsfläche pro m³ Reaktorvolumen in der Praxis vielfach bewährt haben. Diese Flächendichte würde bei der MBZ zu einer Leistungsdichte von 200 bis 400 W/m³ führen, was rechnerisch bereits vergleichbar ist mit der Leistungsdichte von Anaerobanlagen.

Die oben genannte Schlussfolgerung der Kostenlimitierung für die Elektrodenoberfläche hat schließlich zu eigenen Aktivitäten in der Entwicklung und Untersuchung von Elektroden auf Basis von Massenwaren geführt. Nachfolgend werden die ersten Ergebnisse beschrieben.

3.4. Experimentelle Untersuchungen

3.4.1. Aufbau der MBZ-Versuchsanlage

Zur Durchführung von ersten orientierenden Versuchen zum Einfluss verschiedener material- und prozesstechnischer Parameter auf die Leistungsfähigkeit der mikrobiologischen Brennstoffzelle wurde ein MBZ-Prüfstand im Labormaßstab aufgebaut (s. Abbildung 5).



Abbildung 5: MBZ-Prüfstand (links) und Ansicht eines Zellenmoduls mit vier Einzelzellen in Reihenschaltung (rechts)

Dieser Prüfstand besitzt kontinuierlich durchströmte Einzelzellen (4 Module á 4 Zellpaare) die mit verschiedenen Elektroden-/Membranpaarungen bzw. -materialien bestückt und zeitgleich in Parallel- oder Reihenschaltung betrieben werden können. Durch eine spezielle Zellengeometrie werden die Elektrodenflächen gleichmäßig überströmt und ermöglichen die Einstellung definierter Scherraten auf den anhaftenden Biofilm. Die Versorgung der einzelnen Anoden- und Kathodenkammern mit Substrat bzw. sauerstoffgesättigtem Wasser erfolgt über getrennte Pumpenkreisläufe mit entsprechender online-Messtechnik u.a. zur Aufzeichnung von Temperatur, pH-Wert und Redoxpotenzial. Über die Verschaltung der Elektroden jeder Einzelzelle mit einem Multiplexer erfolgt eine kontinuierliche Aufzeichnung der Strom- und Spannungsverläufe aller 16 Zellpaare. Zur Leistungsregelung kann eine stufenlose Verstellung der einzelnen Zellen-Lastwiderstände vorgenommen werden.

3.4.2. Erste Ergebnisse

Die Interessantesten der ersten Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt. Neben der Prüfung vorhandener Elektrodenmaterialien und Kationenaustauscher-Membranen (Nafion® und Selmion CMV) wurden zum Vergleich selbst hergestellte Elektroden durch Graphitbeschichtung von Edelstahlkollektoren untersucht. Dabei wurde auf Beimischung von Katalysatormaterialien bewusst verzichtet. Entgegen den Erwartungen stellte sich auch an diesem Zellenpaar eine Stromproduktion ein. Diese ist auf eine biokatalytische Aktivität auf der Kathodenseite zurückzuführen, wie Hemmungstests auf der Kathodenseite belegten.

Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der flächenspezifischen Leistungsdichte über die Versuchsdauer von 18 Tagen. Die Untersuchungen wurde mit einer Glukoselösung durchgeführt. Verschiedene Zwischenfälle wie vollständiger Substratabbau, Substratzugabe, pH-Abnahme sowie pH-Anhebung zeigen deutlich, dass die Stromproduktion biokatalytisch erfolgt. Auf der Kathodenseite ist ebenfalls ein vollständig ausgebildeter Biofilm festgestellt worden, so dass in weitergehenden Untersuchungen geklärt wird, welche Verbindungen die Elektronenakzeptoren sind.

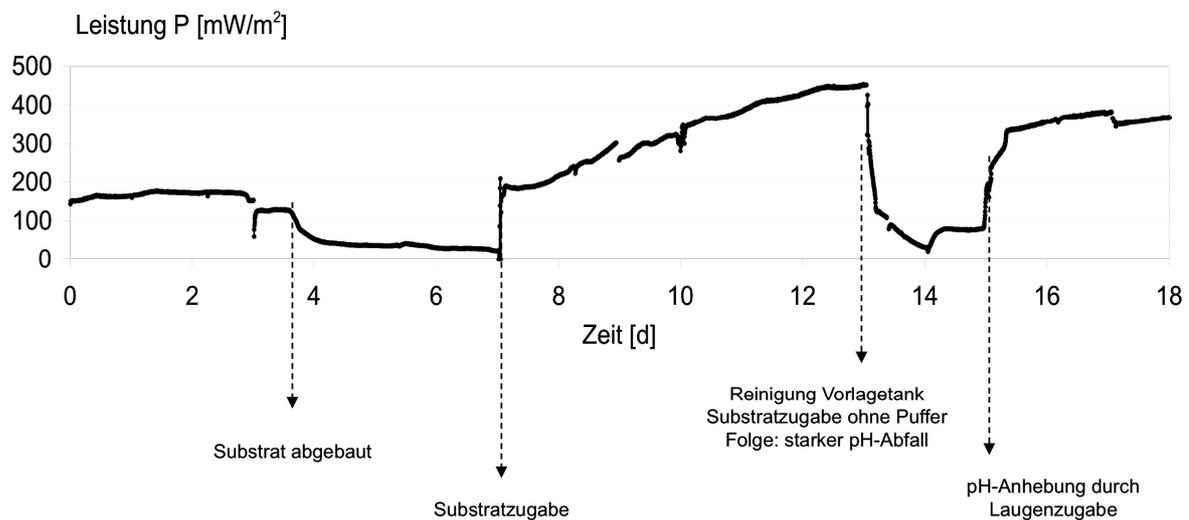


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Leistungsdichte

Der Versuch wurde nach einer mehrwöchigen Unterbrechung weitergeführt. Dabei zeigte sich, dass die ursprüngliche Leistung bereits nach 3-4 Tagen wieder erreicht wurde und im weiteren Verlauf durch Anpassung des Lastwiderstandes weiter anstieg. Abbildung 7 zeigt den Einfluss des Lastwiderstandes auf die Leistungsdichte des Zellpaares und die Existenz eines Optimums, das zu dem Mess-Zeitpunkt bei 120 Ohm lag. Die maximale Stromdichte lag zu diesem Zeitpunkt (ca. 4 Wochen später) bereits bei 0,63 W/m² Anodenfläche.

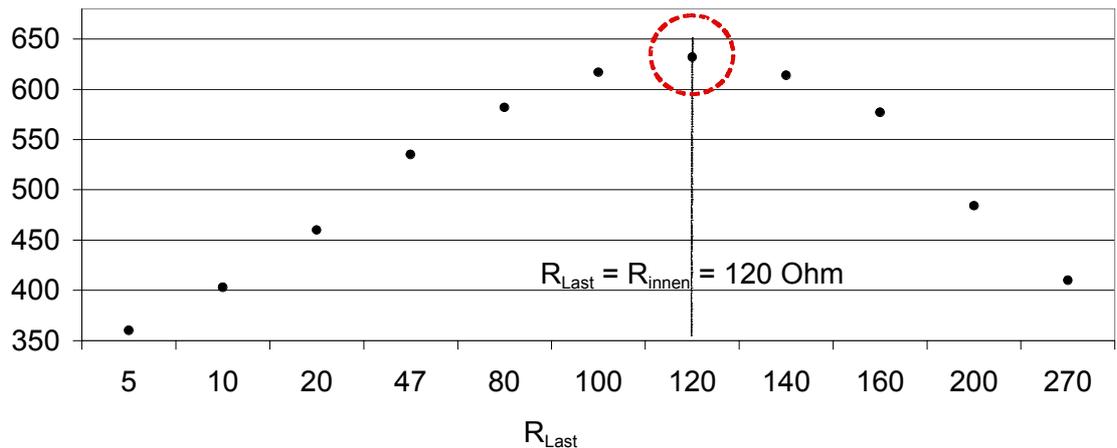


Abbildung 7: Leistungsdichte der MBZ als Funktion des Lastwiderstandes

Die für die Machbarkeitsstudie wesentliche Erkenntnis dieser Untersuchung ist die Tatsache, dass mit der Leistungsdichte von über $0,6 \text{ W/m}^2$ bereits ein um Faktor 2 bis 3 besserer Wert gegenüber Literaturdaten für die wässrige Kathode erzielt wurde. Dieses darüber hinaus mit einer Bio-Kathode. Es fehlt allerdings noch ein Faktor 3 bis 4 zur oben angenommenen Leistungsdichte. Außerdem steht noch der Versuch mit realem Abwasser aus. Gleichzeitig muss auch beachtet werden, dass die Materialkosten für die Elektroden bisher nur einen unwesentlichen Teil der oben genannten $7,5 \text{ Euro pro m}^2$ betragen, so dass durchaus eine kleinere Leistungsdichte ausreichend ist. Weiterhin muss beachtet werden, dass das Potenzial der Materialoberfläche und –beschichtung bei weitem nicht ausgeschöpft ist.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass die bioelektrochemische Brennstoffzelle ein wirtschaftliches Anwendungspotenzial enthält und mittel- bis langfristig in die Praxis umgesetzt wird. Der Abwasserbereich - und hierzu gehören auch die Industrieabwässer - bietet wegen des anwendbaren Temperatur- und Konzentrationsbereiches und nicht zuletzt aufgrund der gleichzeitigen Energieeinsparung vergleichsweise gute Voraussetzungen.

Literaturverzeichnis

Lämmel, A. (1999): Entwicklung eines Sensorsystems zur Messung der biologischen Aktivität von Mikroorganismen und tierischen Zellen, Dissertation, Universität Hannover.

Logan Bruce E. (2008): Microbial Fuel Cells, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.

Müller E A, Kobel B, Künti T, Pinnekamp J, Seibert-Erling G, Böcker K (1999). Handbuch Energie in Kläranlagen MURL NRW, Düsseldorf, Germany.

Rabaey K., Angenent L., Schröder U, Keller J (2010): Bioelectrochemical systems: From extracellular electron transfer to biotechnological application. IWA Publishing, London.

Rohrback GH, Scott WR Canfield JH (1962) Biochemical fuel cells. Proceedings 16th Annual Power Sources Conference, 18-21.

Sell, D. (1991): Untersuchungen zur Elektrochemie und Biochemie einer bioelektrochemischen Brennstoffzelle, Dissertation, Universität Dortmund.

Sell D (2004): Wege zur online Bestimmung der mikrobiellen Stoffwechselaktivität mittels einer neuartigen Bioaktivitätssensorik. Habilitationsschrift, Universität Hannover.